Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 36, 1, 2024. (47-58)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Comparison of Regression, Artificial Bee Colony, and Neural Network for Predicting Die Filling in the Stamping of Titanium Sheet for Manufacturing Bipolar Plates for PEM Fuel Cell*

Research Article

Vahid Modanloo[1], Ahmad Mashayekhi[2], Behnam Akhoundi[3]

DOI:

1- Introduction

In recent years, researchers have proposed the use of clean and renewable energies as a suitable alternative to fossil fuels. One of these energy sources is fuel cells that produce electrical energy with high efficiency and without environmental pollution. Fuel cells are classified into different types, including alkaline, solid oxide, and proton membrane fuel cells. Among the mentioned options, proton membrane fuel cells (PEMFC) have been favored by researchers due to their high power, fast start-up, and low working temperature. One of the important components of this type of fuel cell is the bipolar plates (BPPs). Microchannel on the BPPs is responsible for the better distribution of hydrogen and oxygen, the release of the water produced by reactions, transfer of produced electrons, cooling, and reducing the temperature of the fuel cell assembly in order to increase efficiency. To reduce the weight of the vehicle, BPPs should be as light as possible. Moreover, BPPs work in an acidic environment. Therefore, they must have high corrosion resistance. The materials that have been used to fabricate BPPs are graphite, composite, and metal. Metallic BPPs exhibit unique characteristics, such as good mechanical, electrical, and thermal properties. Researchers have used various methods to manufacture metallic BPPs, such as rubber-pad forming, hydroforming, and stamping. One of the important points that can be mentioned in the fabrication of the metallic BPPs is to achieve the maximum microchannel depth with uniform thickness distribution. The higher depth of the microchannel leads to better distribution of oxygen and hydrogen and as a result, increases the efficiency of the fuel cell. Moreover, a non-uniform thickness distribution leads to stress concentration and the tearing phenomenon occurs in the sheet. Titanium is a lightweight material and its density is lower than steel. In addition, titanium exhibits good corrosion resistance compared to steel. Therefore, titanium rises as a suitable candidate for BPPs in PEMFCs. On the other hand, titanium has a lower formability than steel at room temperature due to its HCP crystal structure. Therefore, the forming parameters must be optimally controlled in the stamping titanium sheet. In this paper, the manufacturing of BPPs to be used in PEMFCs made of commercially pure titanium with an initial thickness of 0.1 mm is investigated. After evaluating the mechanical properties of the sheet using a uniaxial tensile test, the stamping process is carried out by experiment and finite element simulation. A regression model for predicting die filling rate based on forming parameters (e.g., die clearance, stamping speed, and friction coefficient) is presented via the response surface method (RSM). The obtained equation is optimized using the artificial bee colony algorithm. Finally, by using an artificial neural network, the die-filling rate is estimated with acceptable accuracy.

2- Results

Table 5 shows the results of the die filling rate for designed experiments. The output regression model according to equation (1) was obtained with model goodness (R^2) of 98.95%, which is desired. Furthermore, the average absolute value of the error in estimating the filling rate for this model was obtained as $82.16\times10^{-3\%}$. Next, the obtained equation was used for optimization by the artificial bee colony algorithm. A total number of 200 bees were used with 100000 iterations; after 20 optimizations the best coefficients were determined as indicated in equation (2). Using this equation, the defined error is reduced to 45.98×10^{-3}%. To predict the filling rate using an artificial neural network algorithm, three parameters (i.e. die clearance, stamping speed, and friction coefficient) were considered input and filling rate as network output. Then, an artificial neural network with three inputs, six hidden layers, one design output, and the numbers in Tables 4 and 5 were used as inputs and outputs for its training as indicated in Figure 1. After six periods of training this artificial neural network, an output with

*Manuscript received: September 22, 2023. Revised, October 14, 2023, Accepted, December 12, 2023.

[1] Corresponding author. Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran. **Email**: v.modanloo@sirjantech.ac.ir,

[2] Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

[3] Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.

good accuracy was obtained and the absolute value of the filling rate prediction error was reduced to 0.0097×10^{-3}.

Table 1. Results of the filling rate

Experiment no,	Filling rate (%)
1	0.41
2	0.41
3	0.43
4	0.39
5	0.45
6	0.44
7	0.41
8	0.42
9	0.44
10	0.43
11	0.40
12	0.35
13	0.41
14	0.41
15	0.43
16	0.41
17	0.40
18	0.46
19	0.34
20	0.41

$$Filling\ (\%) = 1.191 - 7.37\ C + 0.0242\ V - 2.811\ \mu + 20.36C^2 - 0.00545V^2 + 1.09\mu^2 - 0.0667CV + 10.00C\mu + 0.0667V\mu \quad (1)$$

$$Filling\ (\%) = 1.191 - 7.37\ C + 0.0242\ V - 2.811\ \mu + 10.0644C^2 - 0.00487V^2 + 2.1800\mu^2 - 0.0077CV + 11.4489C\mu + 0.02243V\mu \quad (2)$$

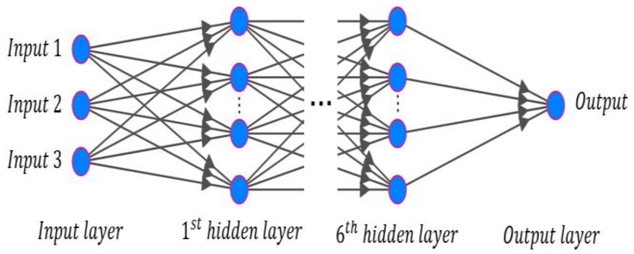


Fig. 1. Used neural network structure

The used methods to predict the filling rate are comparable to each other in different ways. The first comparison factor is the sum of the absolute value of the errors in the prediction of the filling rate. The errors for three regression methods, artificial bee, and artificial neural network are compared in Table 3. Moreover, a graphic comparison of the experimental filling rate and those obtained from the mentioned methods is shown in Figure 2. In this figure, the filling rate obtained from the experiments is compared with the filling rate obtained by regression method, artificial bee colony method, and artificial neural network.

Table 3. Comparison of various predictive methods

Method	Error (%)
RSM	82.16×10-3
ABCO	45.98×10-3
ANN	0.0097×10-3

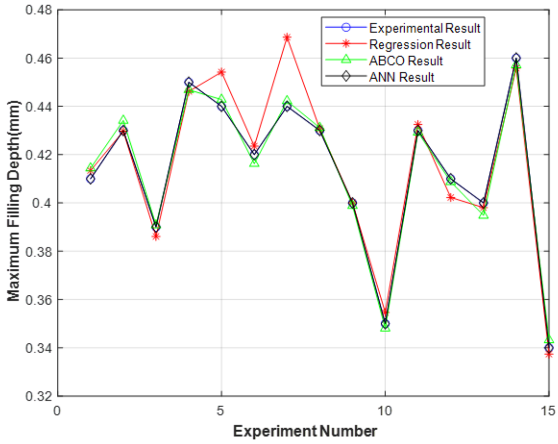


Fig. 2. Comparison of the die filling obtained by various methods

3- Conclusion

In this paper, the modeling of the stamping process of the titanium BPPs for PEM fuel cells was investigated. By using a finite element simulation model validated with experimental results, the process was modeled using the RSM. Then, three different methods were used to predict the microchannel filling rate. The first method is based on regression and a quadratic equation was presented in terms of die clearance, stamping speed, and friction coefficient to predict the filling rate. Next, using the artificial bee colony method, the coefficients of the equation created by the regression method were improved. Next, by applying an artificial neural network, the best agreement was obtained to predict the filling rate of the die (without providing a formula). The results showed that the sum of the absolute value of the error using the artificial bee colony method reduced from 82.16×10^{-3} to 45.98×10^{-3} in comparison with the regression method. Furthermore, by using the proposed artificial neural network, a network with three inputs and one output could predict the filling rate with high accuracy and reduce the error to 0.0097×10^{-3}.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

مقایسه روش‌های رگرسیون، کلونی زنبور عسل و شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی پرشدگی قالب در مهرزنی صفحات دو قطبی پیل سوختی*

مقاله پژوهشی

وحید مدانلو(۱) احمد مشایخی(۲) بهنام آخوندی(۳)

DOI: 10.22067/jacsm.2023.84567.1205

چکیده *افزایش عمق میکروکانال‌های صفحات دو قطبی فلزی در پیل‌های سوختی غشای پروتون منجر به افزایش بازده خواهد شد. در این پژوهش، از فرایند مهرزنی برای ساخت صفحات دو قطبی از جنس تیتانیوم خالص تجاری با الگوی شیاری موازی مستقیم استفاده شده است. تأثیر پارامترهای فرایند شامل لقی قالب، سرعت شکل‌دهی و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب بر روی نرخ پرشدگی و میزان نازک‌شدگی صفحات دو قطبی بررسی شد. آزمایش‌های لازم با استفاده از روش رویه پاسخ طراحی، با استفاده از مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شده اجرا و خروجی‌های مورد نظر استخراج شدند. سپس با استفاده از روش رگرسیون، یک معادله درجه دوم برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی بر اساس پارامترهای ورودی ارائه شد. در ادامه با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، ضرایب معادله مذکور بهبود یافته و میزان خطای آن در حدود ۵۳٪ کاهش یافت. در پایان نیز از یک شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی استفاده شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی پیشنهادی بسیار مؤثر بوده و با دقت بسیار بالایی نرخ پرشدگی میکروکانال را تقریب می‌زند.*

واژه‌های کلیدی صفحات دو قطبی تیتانیومی، عمق شکل‌دهی، فرایند مهرزنی، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، شبکه عصبی مصنوعی.

Comparison of Regression, Artificial Bee Colony, and Neural Network for Predicting Die Filling in Stamping of Bipolar Plates Fuel Cell

Vahid Modanloo Ahmad Mashayekhi Behnam Akhoundi

Abstract *Increasing the depth of microchannels on metallic bipolar plates (BPPs) in PEM fuel cells leads to an increase in the efficiency. In this research, the stamping process has been applied for manufacturing of the BPPs made of commercially pure titanium with a direct parallel flow field. The effect of process parameters including die clearance, forming speed, and sheet/die friction coefficient on the filling rate and thinning of the BPPs was investigated. The required tests were designed via the response surface method (RSM), implemented by a validated finite elements (FE) model, and the desired outputs were extracted. Then, a quadratic equation was presented for predicting the filling rate based on the input parameters using the regression method. In the following, using the artificial bee colony algorithm, the coefficients of the mentioned equation were enhanced and its error was decreased almost by 53%. Finally, an artificial neural network (ANN) was used to predict the filling rate. The results demonstrated that the proposed ANN model is very effective and approximates the filling rate of the microchannel with high accuracy.*

Key Words Titanium bipolar plates, Forming depth, Stamping process, Artificial bee colony algorithm, Artificial neural network.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۶/۳۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۹/۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، کرمان، ایران. **Email**: v.modanloo@sirjantech.ac.ir

(۲) استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، کرمان، ایران.

(۳) استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، کرمان، ایران.

مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر به عنوان یک جایگزین مناسب برای سوخت‌های فسیلی از سوی محققان مطرح شده‌اند [1]. یکی از این منابع انرژی، پیل‌های سوختی هستند که انرژی الکتریکی با بازده بالا و بدون آلودگی زیست‌محیطی تولید می‌کنند [2]. پیل‌های سوختی بر اساس متغیرهایی نظیر نوع الکترولیت، دما و فشار کاری، نوع واکنش‌دهنده، استفاده مستقیم یا غیرمستقیم از سوخت به انواع مختلفی مانند پیل سوختی قلیایی، پیل سوختی اکسید جامد و پیل سوختی غشاءِ پروتون دسته‌بندی می‌شوند [3]. از میان گزینه‌های مذکور، پیل‌های سوختی غشای پروتون به دلیل قدرت بالا، راه‌اندازی سریع و دمای کاری کم با اقبال بیشتری از سوی پژوهشگران مواجه شده‌اند [4]. یکی از اجزای مهم این نوع پیل سوختی صفحات دو قطبی می‌باشند که وظیفه میکروکانال‌های روی آن‌ها توزیع بهتر هیدروژن و اکسیژن، خروج آب تولیدشده ناشی از واکنش‌ها، انتقال الکترون‌های تولیدی، خنک‌کاری و کاهش دمای مجموعه پیل سوختی به منظور افزایش بازده است [5]. به‌منظور کاهش وزن وسیله نقلیه، صفحات دو قطبی باید تا حد ممکن سبک باشند [6]. همچنین از آنجا که صفحات دو قطبی در محیط اسیدی کار می‌کنند، باید مقاومت به خوردگی بالایی داشته باشند [7]. جنس‌هایی که تا کنون برای ساخت این صفحات استفاده شده‌اند عبارت است از گرافیت [8]، کامپوزیت [9] و فلز [10]. تا کنون پژوهشگران از روش‌های گوناگونی برای ساخت این صفحات استفاده کرده‌اند که از جمله این روش‌ها می‌توان به شکل‌دهی لاستیکی [11]، شکل‌دهی با سیال [12] و مهرزنی [13] اشاره نمود. از یک سو، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد صفحات دو قطبی فلزی مانند خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی خوب [14] و از سوی دیگر، به دلیل هزینه تولید پایین و سهولت اجرای فرایند مهرزنی [15]، در این تحقیق ساخت صفحات دو قطبی پیل سوختی از جنس تیتانیوم خالص تجاری با استفاده از فرایند مهرزنی بررسی شده است. از نکات مهم که در ساخت صفحات دو قطبی فلزی می‌توان به آن‌ها اشاره کرد دستیابی به بیشترین عمق میکروکانال با توزیع ضخامت یکنواخت است [16]. عمق بیشتر میکروکانال منجر به توزیع بیشتر اکسیژن و هیدروژن و درنتیجه افزایش بازده پیل سوختی می‌شود [12]. همچنین عدم توزیع ضخامت منجر به تمرکز تنش و در نتیجه وقوع پدیده پارگی در ورق می‌شود [17]. بیشتر پژوهش‌های انجام شده نیز در مهرزنی صفحات دو قطبی پیل سوختی با تمرکز بر روی بهبود شکل‌پذیری این صفحات انجام شده که جدول (۱) خلاصه‌ای از آن‌ها را نشان می‌دهد.

همان طور که مشاهده می‌شود بیشتر پژوهش‌های پیشین انجام شده در خصوص با صفحات فولادی است. از آنجا که چگالی تیتانیوم در حدود ۶۰٪ فولاد بوده و نیز صفحات دو قطبی ۶۰ تا ۸۰٪ از وزن مجموعه پیل سوختی را شامل می‌شوند [28]، با تولید صفحات دو قطبی تیتانیومی وزن مجموعه پیل سوختی به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه قرار داشتن صفحات دو قطبی در محیط مرطوب و به شدت اسیدی، صفحات دو قطبی فلزی فولادی معمولا پس از تولید پوشش‌دهی می‌شوند [29].

با توجه به خواص مقاومت به خوردگی استثنایی تیتانیوم نسبت به فولاد (در حدود ۱۲۰ برابر)، هزینه‌های اعمال پوشش بسیار کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، تیتانیوم به دلیل ساختار بلوری منشوری فشرده (HCP)، میزان شکل‌پذیری کمتری نسبت به فولاد و آلومینیوم در دمای محیط دارد. از همین رو پارامترهای شکل‌دهی باید در مهرزنی صفحات دو قطبی پیل سوختی از جنس تیتانیوم خالص تجاری به نحوی بهینه کنترل شوند تا ضمن عدم وقوع پارگی، صفحه‌ای سالم با حداکثر عمق شکل‌دهی ساخته شود.

در این مقاله، ساخت صفحات دو قطبی پیل سوختی از جنس تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت ورق اولیه ۰/۱ میلی‌متر با استفاده از فرایند مهرزنی بررسی شده است. پس از ارزیابی خواص مکانیکی ورق تیتانیوم خالص تجاری با استفاده از آزمون کشش تک‌محوره، فرایند مهرزنی به صورت تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود انجام خواهد شد. یک مدل رگرسیون برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی قالب بر اساس پارامترهای شکل‌دهی ارائه خواهد شد. در ادامه با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، رابطه مذکور بهینه شده و میزان خطای آن کاهش خواهد یافت. در پایان نیز با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی، میزان نرخ پرشدگی قالب با دقت قابل قبولی تخمین زده خواهد شد.

جدول ۱ خلاصه‌ای از پژوهش‌های گزارش‌شده در زمینه مهرزنی صفحات دو قطبی فلزی پیل سوختی

شماره مرجع	نویسندگان (سال)	جنس ورق (ضخامت: میلی‌متر)	هسته اصلی تحقیق
[18]	ماهابونپاچای و همکاران (۲۰۱۰)	فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴، ۳۱۶L، ۴۳۰، نیکل ۲۷۰ و تیتانیوم گرید ۱ (۰/۰۵۱)	بررسی تأثیر سرعت و نیروی شکل‌دهی بر روی شکل‌پذیری کانال، زبری سطح، مقاومت به خوردگی و مقایسه فرایند مهرزنی با فرایند هیدروفرمینگ
[19]	کو و همکاران (۲۰۱۳)	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (۰/۱) و آلومینیوم ۵۰۵۲ (۰/۳)	ارزیابی عمق کانال و نازک‌شدگی از طریق مقایسه فرایند مهرزنی با نیروی استاتیکی و دینامیکی با دامنه‌های سینوسی، مربعی و شیب‌دار
[20]	پارک و همکاران (۲۰۱۶)	فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ (۰/۱)	بررسی پارامترهای فرایند مهرزنی مانند جهت قرار گرفتن ورق روی قالب، عملیات حرارتی و نوع نیروی استاتیکی یا دینامیکی بر روی نسبت نازک‌شدگی و عمق شکل‌دهی
[21]	نتو و همکاران (۲۰۱۹)	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (۰/۱)	مطالعه شبیه‌سازی پارامترهای هندسی قالب مهرزنی بر روی بیشینه نازک‌شدگی در دو ناحیه صفحات دو قطبی (سطح مقطع مستقیم و خم‌شده)
[22]	ژائو و پنگ (۲۰۱۹)	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (۰/۱)	به‌کارگیری یک مدل تحلیلی با توجه به اثر اندازه برای برقراری ارتباط بین عمق شکل‌دهی و پارامترهای هندسی قالب
[23]	کاراچان و همکاران (۲۰۲۰)	فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، تیتانیوم گرید ۲، آلومینیوم ۶۰۱۶ و ۳۱۰۴ (۰/۱)	ارزیابی شکل‌پذیری کانال از نقطه‌نظر عمق شکل‌دهی در ۱۶ حالت مختلف با دو عرض کانال و چهار عمق کانال متفاوت
[24]	ژو و همکاران (۲۰۲۱)	تیتانیوم TA2 (۰/۱۵)	به‌کارگیری فرایند مهرزنی چند مرحله‌ای به منظور افزایش عمق شکل‌دهی و دستیابی به عمق حداکثر ۰/۶۲۱ میلی‌متر و مقایسه فرایند با مهرزنی تک مرحله‌ای
[25]	ژنگ و همکاران (۲۰۲۲)	فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L (۰/۱)	بررسی تجربی شروع شکست میکروکانال‌ها با استفاده از مدل اجزای محدود دو بعدی با استفاده از منحنی حد شکل‌دهی جهت پیش‌بینی نازک‌شدگی
[26]	ونگ و همکاران (۲۰۲۲)	فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L (۰/۱)	به‌کارگیری مدل Yld2000 جهت افزایش دقت مدل اجزای محدود با انجام آزمون کشش دو محوره جهت پیش‌بینی برگشت فنری و توزیع ضخامت
[27]	گو و همکاران (۲۰۲۳)	فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L (۰/۱)	بررسی اثر پارامترهای فرایند شامل دما، شرایط روانکاری و اثر اندازه بر روی شکل‌پذیری و دقت ابعادی صفحات دو قطبی در مهرزنی گرم

مراحل تجربی

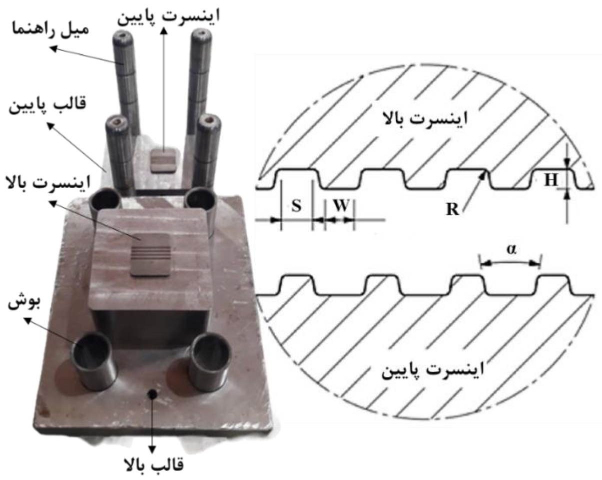
در این تحقیق برای ساخت صفحات دو قطبی پیل سوختی غشای پروتون، از ورق تیتانیوم خالص تجاری با ضخامت اولیه ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. تیتانیوم به دلیل مقاومت به خوردگی بالا و چگالی پایین گزینه مناسبی برای ساخت صفحات دو قطبی فلزی است [30]. برای استخراج خواص مکانیکی و فیزیکی ورق، نمونه‌های آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTME8M با استفاده از دستگاه وایرکات آماده شدند. برای انجام آزمون کشش از دستگاه سنتام با ظرفیت ۲۵ تن استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های تجربی یک قالب مهرزنی با الگوی چهار کانال موازی مستقیم به صورت درون‌چین (Insert) ساخته شد. این امر امکان بررسی سایر الگوها برای پژوهش‌های آتی را فراهم می‌کند. برای ساخت اینسرت‌ها از فولاد H13 به دلیل خواص مقاومت به سایش بالای این جنس استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های مهرزنی از یک دستگاه پرس سنتام با ظرفیت ۵۰ تن استفاده شد. شکل (۱) مجموعه قالب استفاده شده را نشان می‌دهد. همچنین، ابعاد هندسی قالب مهرزنی در جدول (۲) ارائه شده است. پس از انجام آزمایش‌ها، صفحات

دو قطبی شکل داده شده درون رزین اپوکسی مانت شدند و پس از پولیش‌کاری با استفاده از سمباده چرخان، زیر میکروسکوپ نوری با میزان بزرگ‌نمایی ۴۰ برابر مشاهده و میزان عمق پرشدگی و ضخامت نهایی آن‌ها اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری نرخ پرشدگی قالب از رابطه (۱) استفاده شد که در آن h میزان عمق شکل داده شده و H نیز عمق قالب (۰/۷۵ میلی‌متر) است [31]. برای بررسی میزان نازک‌شدگی نیز از رابطه (۲) استفاده شد که در آن t_0 و t_f به ترتیب ضخامت اولیه ورق و ضخامت نهایی صفحه دو قطبی شکل داده شده می‌باشند [31].

$$\%Filling\ rate = \frac{h}{H} \times 100 \qquad (۱)$$

$$\%Thining\ rate = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 \qquad (۲)$$



شکل ۱ قالب استفاده شده در آزمایش‌های تجربی

جدول ۲ ابعاد هندسی قالب مهرزنی

پارامتر	H	α	R	W	S
مقدار	۰/۷۵	۲۰	۰/۲	۱/۱	۱/۲
(واحد)	(میلی‌متر)	(درجه)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)

شبیه‌سازی اجزای محدود

در این تحقیق، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس برای شبیه‌سازی فرایند مهرزنی صفحات دو قطبی فلزی پیل سوختی استفاده شد. از یک مدل دو بعدی کرنش صفحه‌ای با فرض قطعه شکل‌پذیر و قالب صلب تحلیلی استفاده شد. در نتیجه، ورق با المان CPE4R مش‌بندی شد. تعداد المان‌ها در راستای ورق ۴ عدد انتخاب شد که بر اساس پژوهش‌های پیشین و شبیه‌سازی‌های اولیه انتخاب شد [15]. سرعت شکل‌دهی به مقدار ۰/۶ میلی‌متر بر دقیقه با استفاده از نقطه مرجع به اینسرت بالا اعمال شد. همچنین اینسرت پایین به‌طور کامل در جای خود مقید شد. برای اطمینان از در نظر گرفتن پدیده برگشت فنری، یک تحلیل ثانویه برای برگشت سنبه نیز در نظر گرفته شد. مطابق با مرجع [15]، ضریب اصطکاک بین ورق و قالب نیز مقدار ۰/۱ انتخاب شد. با توجه به اینکه ورق تیتانیوم به صورت کویل رول شده خریداری شد، فرض ناهمسانگرد بودن آن معقول بوده و باید در شبیه‌سازی لحاظ شود. از همین رو، ضرایب ناهمسانگردی در راستاهای نورد (r_0)، عمود بر نورد (r_{90})، و قطری (r_{45})، با استفاده از آزمون کشش استخراج شد. در ادامه نسبت‌های تنش‌های تسلیم مورد نیاز برای شبیه‌سازی محاسبه شد که در جدول (۳) این مقادیر نشان داده شده است.

جدول ۳ نسبت‌های تنش تسلیم ورق استفاده شده در شبیه‌سازی

نسبت	R_{23}	R_{13}	R_{12}	R_{33}	R_{22}	R_{11}
مقدار	۱	۰/۸۱۵	۰/۰۲	۱/۲۸۴	۰/۹۱۱	۱

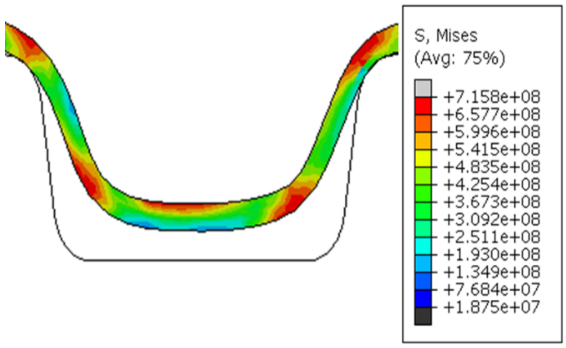
روش‌های مدل‌سازی فرایند

روش رویه پاسخ

در مرحله اول تحقیق، از روش آماری رویه پاسخ برای طراحی آزمایش و یافتن پاسخ بهینه نرخ شکل‌دهی استفاده شد. در این روش از یک معادله درجه دوم کامل برای برازش (رگرسیون) تابع خروجی بر اساس متغیرهای ورودی استفاده می‌شود [32]. با استفاده از سه پارامتر لقی قالب، سرعت شکل‌دهی و ضریب اصطکاک بین ورق و قالب، تعداد ۲۰ آزمایش طراحی شد که در جدول (۴) آمده است. از نرم‌افزار مینی‌تب برای طراحی آزمایش استفاده شد [33]. آزمایش‌های طراحی‌شده با استفاده از مدل اجزای محدود صحت‌سنجی شده اجرا و میزان نرخ پرشدگی و نازک‌شدگی هر آزمایش استخراج شد. در شکل (۲) یک نمونه پرشدگی قالب به صورت شبیه‌سازی نشان داده شده است.

جدول ۴ طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ

شماره آزمایش	لقی قالب (میلی‌متر)	سرعت شکل‌دهی (میلی‌متر/دقیقه)	ضریب اصطکاک
۱	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵
۲	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵
۳	۰/۱۵۰	۳/۵	۰/۱۰
۴	۰/۱۷۵	۲	۰/۲۰
۵	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۰
۶	۰/۲۰۰	۲	۰/۱۵
۷	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵
۸	۰/۲۰۰	۰/۵	۰/۲۰
۹	۰/۲۰۰	۰/۵	۰/۱۰
۱۰	۰/۲۰۰	۳/۵	۰/۲۰
۱۱	۰/۱۷۵	۰/۵	۰/۱۵
۱۲	۰/۱۵۰	۳/۵	۰/۲۰
۱۳	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵
۱۴	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵
۱۵	۰/۱۵۰	۰/۵	۰/۱۰
۱۶	۰/۱۷۵	۳/۵	۰/۱۵
۱۷	۰/۱۵۰	۲	۰/۱۵
۱۸	۰/۲۰۰	۳/۵	۰/۱۰
۱۹	۰/۱۵۰	۰/۵	۰/۲۰
۲۰	۰/۱۷۵	۲	۰/۱۵



شکل ۲ نمایش پرشدگی قالب به‌صورت شبیه‌سازی

الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی

در مرحله دوم تحقیق، از روش بهینه‌سازی زنبور عسل مصنوعی برای تخمین نرخ پرشدگی استفاده شده است. این روش بر مبنای کارکرد واقعی زنبورهای عسل در یافتن بهترین شهد استوار شده است [34]. در واقع برای یافتن بهترین شهد (بهترین جواب) زنبورها به صورت اتفاقی در فضای اطراف کندو (فضای جستجوی مسئله) پخش می‌شوند و مقداری از شهد را با خود به کندو می‌آورند و مکان دستیابی به شهد را نیز به خاطر می‌سپارند. سپس کیفیت تمامی شهدها (کیفیت جواب‌ها) در کندو با یکدیگر مقایسه می‌شود. در کاوش‌های بعدی زنبورها برای یافتن شهد، زنبورها با احتمال بیشتری به سمت جایی می‌روند که پیش‌تر قبلا بهترین شهد (بهترین جواب) را داشته است. به این ترتیب زنبورها آرام‌آرام به سمت جایی می‌روند که بهترین شهد (بهترین جواب) در آن قرار دارد؛ ضمن اینکه به دلیل ماهیت اتفاقی یافتن شهدهای جدید (جواب‌های جدید)، همواره شهدهای جدید (جواب‌های جدید) را نیز بررسی می‌کنند؛ لذا شهد بهینه نهایی (جواب بهینه نهایی) از کیفیت بالایی برخوردار خواهد بود [35].

الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی

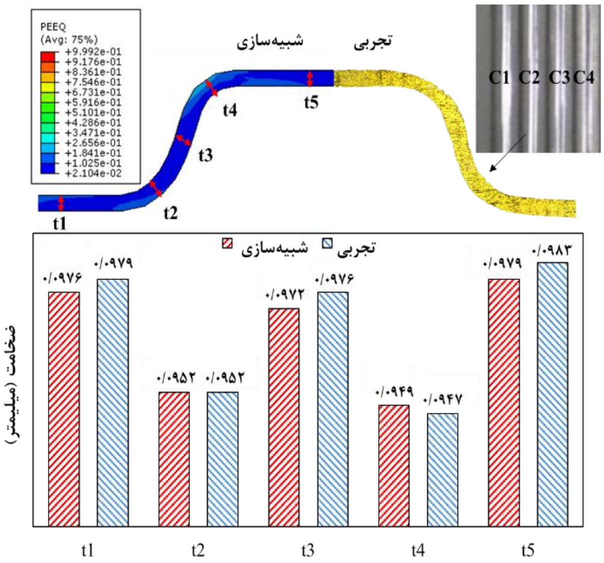
در مرحله سوم تحقیق، از روش شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین نرخ پرشدگی استفاده شده است. شبکه عصبی مصنوعی یک مدل ریاضی است که الهام گرفته از ساختار عصبی مغز انسان است. این شبکه‌ها از واحدهای کوچکی به نام نورون تشکیل شده‌اند که با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. هر نورون ورودی‌های خود را دریافت کرده، آن‌ها را پردازش می‌کند و خروجی تولید می‌کند. این خروجی عموما ضریبی از ورودی‌ها به علاوه مقداری است و می‌تواند در نورونی دیگر وارد شده تا خروجی‌های بعدی را تولید کند. با ترکیب صدها یا حتی هزاران نورون در یک شبکه، قدرت محاسباتی بسیار زیادی به دست می‌آید. سپس خروجی نهایی شبکه با خروجی مورد نظر قیاس شده، خطای بین این دو تعیین شده، و به صورت انتشار به عقب در تمامی نورون‌ها اعمال می‌شود تا تمامی ضرایب بهبود یابند. این کار چندین بار انجام می‌شود تا شبکه عصبی مصنوعی بتواند با خروجی‌های مورد نظر را به‌خوبی تخمین بزند. این الگوریتم در کاربردهای زیادی از قبیل پیش‌بینی و بهینه‌سازی استفاده می‌شود [36-38].

نتایج و بحث

صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی زمانی معتبر هستند که با نتایج آزمایشگاهی

مقایسه و صحت آن‌ها تأیید شود [39]. در این مقاله برای اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی، نتایج عددی نازک‌شدگی صفحه دو قطبی مهرزنی شده با نتایج تجربی (میکروکانال شماره ۲) مقایسه شد که در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق با شکل، بین نتایج عددی و تجربی مطابقت خوبی برقرار بوده، در نتیجه صحت مدل اجزای محدود تأیید و از آن برای اجرای آزمایش‌های طراحی شده با روش رویه پاسخ استفاده خواهد شد. لازم به ذکر است که در این شکل منظور از C1-C4 میکروکانال‌های یک تا چهار می‌باشد که مقایسه ضخامت میکروکانال شماره دو ارائه شده است.



شکل ۳ مقایسه ضخامت صفحه دو قطبی مهرزنی شده در حالت تجربی و شبیه‌سازی

پیش‌بینی نرخ پرشدگی با روش رویه پاسخ

جدول (۵) نتایج نرخ پرشدگی قالب را برای آزمایش‌های طراحی‌شده نشان می‌دهد. مدل رگرسیون خروجی مطابق با رابطه (۳) با کفایت مدل (R^2) ۹۸٪/۹۵ به دست آمد که رضایت‌بخش است. همچنین میزان میانگین قدر مطلق خطا در تخمین نرخ پرشدگی برای این مدل 82.16×10^{-3} حاصل شد. به علاوه، آزمایش شماره ۱۸ با لقی قالب ۰/۲ میلی‌متر، سرعت شکل‌دهی ۳/۵ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب اصطکاک ۰/۱ منجر به بهترین درصد پرشدگی قالب (۴۶٪) خواهد شد. همچنین در این آزمایش، میزان نازک‌شدگی برابر با ۴/۶۹٪ حاصل شد.

جدول ۵ نتایج نرخ پرشدگی قالب

شماره آزمایش	نرخ پرشدگی (٪)	شماره آزمایش	نرخ پرشدگی (٪)
۱	۴۱	۱۱	۴۰
۲	۴۱	۱۲	۳۵
۳	۴۳	۱۳	۴۱
۴	۳۹	۱۴	۴۱
۵	۴۵	۱۵	۴۳
۶	۴۴	۱۶	۴۱
۷	۴۱	۱۷	۴۰
۸	۴۲	۱۸	۴۶
۹	۴۴	۱۹	۳۴
۱۰	۴۳	۲۰	۴۱

$$\text{Filling rate}(\%) = 1.191 - 7.37\,C + 0.0242\,V - 2.811\,\mu + 20.36\,C^2 - 0.00545\,V^2 + 1.09\,\mu^2 - 0.0667C \times V + 10.00C \times \mu + 0.0667V \times \mu \quad (۳)$$

پیش‌بینی نرخ پرشدگی با روش کلونی زنبور عسل مصنوعی

در این قسمت معادله (۳) که پیش‌تر توسط روش رگرسیون به دست آمده بود، برای بهبود پیش‌بینی میزان نرخ پرشدگی، توسط روش کلونی زنبور عسل مصنوعی بهینه‌سازی شده است. برای این منظور ۱۰ ضریب عددی در این معادله به‌عنوان پارامترهای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و توسط این روش به گونه‌ای به دست آمده‌اند که جمع قدر مطلق خطای بین مقدار نرخ پرشدگی پیش‌بینی شده و مقدار به دست آمده از آزمایش‌ها کمینه شود. برای این منظور از تعداد ۴۰ زنبور عسل مصنوعی استفاده شد. نتیجه این بهینه‌سازی در معادله (۴) قابل رؤیت است؛ با استفاده از این معادله خطای تعریف شده به 45.98×10^{-3} کاهش پیدا می‌کند.

$$\text{Filling rate}(\%) = 1.191 - 7.37\,C + 0.0242\,V - 2.811\,\mu + 10.0644C^\wedge 2 - 0.00487V^\wedge 2 + 2.1800\mu^\wedge 2 - 0.0077C \times V + 11.4489C \times \mu + 0.02243V \times \mu \quad (۴)$$

پیش‌بینی نرخ پرشدگی با روش شبکه عصبی مصنوعی

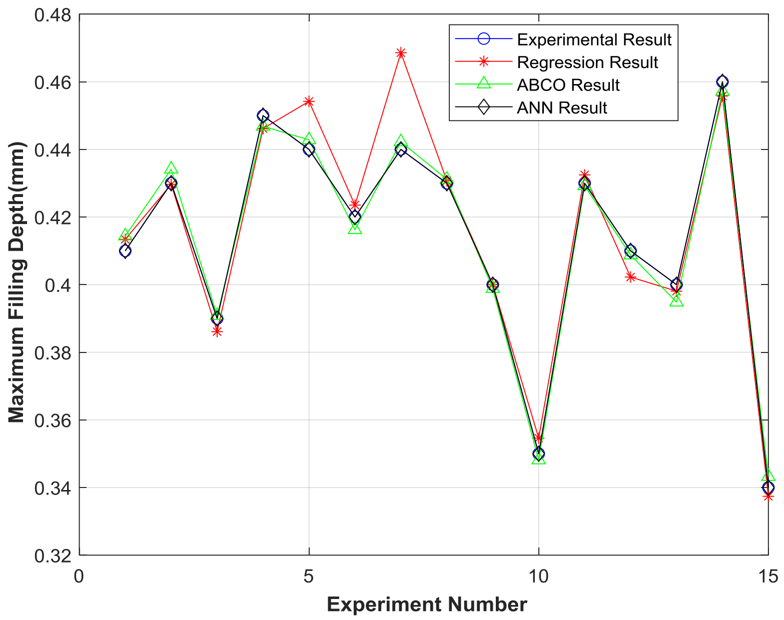
پیش‌بینی نرخ پرشدگی با الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی در این بخش انجام شده است. برای این منظور، سه پارامتر لقی قالب، سرعت شکل‌دهی و ضریب اصطکاک به‌عنوان ورودی و نرخ پرشدگی به‌عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شده است. در ادامه یک شبکه عصبی مصنوعی با سه ورودی، شش لایه مخفی و یک خروجی طراحی و اعداد جداول (۴) و (۵) به عنوان ورودی و خروجی‌ها برای آموزش آن استفاده شد. بعد از شش دوره آموزش دادن به این شبکه عصبی مصنوعی، خروجی با دقت خوبی به دست آمد و مقدار قدر مطلق خطای پیش‌بینی نرخ پرشدگی به میزان 0.0097×10^{-3} کاهش یافت.

مقایسه روش‌ها

روش‌های استفاده شده برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی از جهات مختلف با یکدیگر قابل قیاس هستند. شاید اولین فاکتور مقایسه، مقدار جمع قدر مطلق خطا در پیش‌بینی نرخ پرشدگی باشد. این خطا برای سه روش رگرسیون، زنبور عسل مصنوعی و شبکه عصبی مصنوعی در جدول (۶) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین مقایسه‌ای تصویری بین میزان نرخ پرشدگی واقعی و نرخ پرشدگی به دست آمده از روش‌های مذکور در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل نرخ پرشدگی حاصل از آزمایش‌ها با (خط دایره آبی)، با نرخ پرشدگی به دست آمده توسط روش رگرسیون (خط ستاره قرمز)، روش کلونی زنبور عسل مصنوعی (خط مثلث سبز)، و شبکه عصبی مصنوعی (خط لوزی مشکی) مقایسه شده است.

جدول ۶ میزان خطای روش‌ها در پیش‌بینی نرخ پرشدگی میکروکانال

نام روش	جمع قدر مطلق خطا (٪)
رگرسیون	82.16×10^{-3}
کلونی زنبور عسل مصنوعی	45.98×10^{-3}
الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی	0.0097×10^{-3}



شکل ۴ مقایسه میزان پرشدگی به دست آمده از آزمایش‌ها، روش رگرسیون، روش کلونی زنبور عسل و شبکه عصبی مصنوعی

نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل‌سازی فرایند مهرزنی صفحات دو قطبی تیتانیومی پیل سوختی غشای پلیمری بررسی شد. در ابتدا فرآیند به صورت تجربی با استفاده از یک قالب با الگوی شیاری موازی انجام شد. سپس، با استفاده از یک مدل شبیه-سازی اجزای محدود صحت‌سنجی شده با نتایج تجربی، فرایند با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ مدل‌سازی شد. سپس برای پیش‌بینی میزان نرخ پرشدگی میکروکانال، از سه روش مختلف استفاده شد. اولین روش مبتنی بر رگرسیون بوده و یک معادله درجه دوم بر حسب میزان لقی، سرعت شکل‌دهی و ضریب اصطکاک برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی ارائه شد. در ادامه، با استفاده از روش زنبور عسل مصنوعی ضرایب معادله ایجاد شده توسط روش رگرسیون بهبود یافت. در ادامه با استفاده از یک شبکه عصبی شش لایه، بهترین تطابق برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی قالب (بدون ارائه فرمول) ایجاد شد. نتایج حاصل نشان داد که:

۱. لقی قالب ۰/۲ میلی‌متر، سرعت شکل‌دهی ۳/۵ میلی‌متر بر دقیقه و ضریب اصطکاک ۰/۱ منجر به بهترین درصد پرشدگی قالب (۴۶٪) خواهد شد.

۲. جمع قدر مطلق خطا با استفاده از روش کلونی زنبور عسل مصنوعی در مقایسه با روش رگرسیون، از مقدار 82.16×10^{-3} به 38.76×10^{-3} کاهش می‌یابد.

۳. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، بهترین تطابق برای پیش‌بینی نرخ پرشدگی قالب (بدون ارائه فرمول) به دست می‌آید.

۴. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پیشنهاد شده، یک شبکه با سه ورودی و یک خروجی می‌تواند با دقت بالایی نرخ پرشدگی را پیش‌بینی کرده و مقدار خطا را به 0.0097×10^{-3} کاهش دهد.

واژه‌نامه

درون‌چین	Insert
ساختار بلوری منشوری فشرده	HCP
روش رویه پاسخ	Response surface methodology
الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی	Artificial bee colony Algorithm
شبکه عصبی مصنوعی	Artificial neural network

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] V. Modanloo, M. Elyasi, “Formability of Commercial Pure Titanium in Microchannel Bipolar Plates Using Warm Stamping Process”, *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no.6, pp. 1593-1599, (2020).

[2] H. Hassanzadeh, A. Ferdowsara and M. Barzagary, “Modeling of two phase flow in the cathode of gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cell”, *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, pp. 55-62, (2014).

[3] V. Modanloo, V. Alimirzaloo, and M. Elyasi, “Investigation on forming of titanium bipolar plates using micro-stamping process,” *International Journal of Engineering*, vol. 33, pp. 344-349, (2020). DOI: 10.5829/ije.2020.33.02b.20

[4] F. A. Khatir, M. Barzegari, H. Talebi-Ghadikolaee and S. Seddighi, “Integration of design of experiment and finite element method for the study of geometrical parameters in metallic bipolar plates for PEMFCs”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 39469-39482, (2021). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.161

[5] M. M. Barzegari, F. A. Khatir, “Study of thickness distribution and dimensional accuracy of stamped metallic bipolar plates”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, pp. 31360-31371, (2019). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.225

[6] F. A. Khatir, M. Elyasi, H. T. Ghadikolaee and M. Hosseinzadeh, “Evaluation of effective parameters on stamping

of metallic bipolar plates," *Procedia Engineering*, vol. 183, pp. 322-329, (2017). https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.047

[7] M. Elyasi, H. Talebi Ghadikolaee and M. Hosseinzadeh, "Investigation of dimensional accuracy of metallic bipolar plate's micro channel in rubber pad forming process", *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, no.12, pp461-471, (2016).

[8] Y.-D. Kuan, C.-W. Ciou, M.-Y. Shen, C.-K. Wang, R. Z. Fitriani and C.-Y. Lee, "Bipolar plate design and fabrication using graphite reinforced composite laminate for proton exchange membrane fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no.31, pp. 16801-16814, (2021). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.030

[9] C. Mathew, S. Naina Mohamed and L. S. Devanathan, "A comprehensive review of current research on various materials used for developing composite bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cells", *Polymer Composites*, vol. 43, no.7, pp. 4100-4114, (2022). https://doi.org/10.1002/pc.26691

[10] Y. Leng, P. Ming, D. Yang and C. Zhang, "Stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: Materials, flow channel design and forming processes", *Journal of Power Sources*, vol. 451, p. 227783, (2020). https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227783

[11] H. Talebi-Ghadikolaee, M. Elyasi and M. J. Mirnia, "Investigation of failure during rubber pad forming of metallic bipolar plates", *Thin-Walled Structures*, vol. 150, p. 106671, (2020). https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106671

[12] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, S. Hosseinipour and A. Gorji, "Feasibility study of a double-step hydroforming process for fabrication of fuel cell bipolar plates with slotted interdigitated serpentine flow field", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, pp. 765-777, (2016).

[13] V. Modanloo, V. Alimirzaloo and M. Elyasi, "Multi-objective optimization of the stamping of titanium bipolar plates for fuel cell", *ADMT Journal*, vol. 12, pp. 1-8, (2019).

[14] M. Elyasi, H. T. Ghadikolaee and M. Hosseinzadeh, "Fabrication of metallic bipolar plates in PEM fuel cell using semi-stamp rubber forming process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 765-776, (2017).

[15] V. Modanloo, V. Alimirzaloo and M. Elyasi, "Optimal design of stamping process for fabrication of titanium bipolar plates using the integration of finite element and response surface methods", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, pp. 1097-1107, (2020).

[16] M. Elyasi, H. T. Ghadikolaee and M. Hosseinzadeh, "Investigation of dimensional accuracy in forming of metallic bipolar plates with serpentine flow field", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, pp. 1045-1060, (2018).

[17] M. Elyasi, F. Ahmadi and M. Hosseinzadeh, "Investigation of lubricant effect on depth filling of metallic bipolar plates with concave and convex patterns in rubber pad forming process", *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, no.12, pp. 450-460, (2016).

[18] S. Mahabunphachai, Ö. N. Cora and M. Koç, "Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates", *Journal of Power Sources*, vol. 195,

no.16, pp. 5269-5277, (2010). https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.03.018

[19]J.Y. Koo, Y.P. Jeon and C.G. Kang, "Effect of stamping load variation on deformation behaviour of stainless steel thin plate with microchannel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 227, no.8, pp. 1121-1128, (2013). https://doi.org/10.1177/0954405412462673

[20] W. T. Park, C. K. Jin and C. G. Kang, "Improving channel depth of stainless steel bipolar plate in fuel cell using process parameters of stamping", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, pp. 1677-1684, (2016).